

中国公路学报
China Journal of Highway and Transport
ISSN 1001-7372,CN 61-1313/U

《中国公路学报》网络首发论文

题目：道路融雪除冰技术生命周期内环境负荷分析
作者：郭猛，蔡晓晓，王京京，杜修力
收稿日期：2023-07-24
网络首发日期：2024-03-14
引用格式：郭猛，蔡晓晓，王京京，杜修力. 道路融雪除冰技术生命周期内环境负荷分析[J/OL]. 中国公路学报. <https://link.cnki.net/urlid/61.1313.U.20240314.1544.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

道路融雪除冰技术生命周期内环境负荷分析

郭猛^{1,2}, 蔡晓晓^{1,2}, 王京京^{*1,2}, 杜修力^{1,2}

(1. 北京工业大学 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室, 北京 100124

2. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

Analysis of Environmental Load During the Life Cycle of Road Snow

Melting and Deicing Technology

GUO Meng^{1,2}, CAI Xiao-xiao^{1,2}, WANG Jing-jing^{*1,2}, DU Xiu-li^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Bridge Safety and Resilience, Beijing University of Technology, Beijing 100124

2. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

基金项目：本研究得到了国家重点研发计划（项目编号：2022YFE0137300）和国家自然科学基金（项目编号：52078018）资助。

作者简介：郭猛（1987-），男，黑龙江双城人，教授（博导、博士后），工学博士，主要研究方向为道路工程，E-mail: gm@bjut.edu.cn；蔡晓晓（1995-），女，河南商丘人，在读硕士，E-mail: Caixx@emails.bjut.edu.cn；王京京（1989-），女，河北保定，副教授（博士后），工学博士，E-mail: wangjj@bjut.edu.cn；杜修力（1962-），男，四川广安，教授（中国工程院院士、博导），工学博士，E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn。

***通讯作者：**王京京（1989-），女，河北保定，副教授（博士后），工学博士，主要从事混凝土及其结构全生命周期碳排放、成本动态多目标优化、BIM技术及智能建造方面的研究，E-mail: wangjj@bjut.edu.cn。

Funding: This study was supported by National Key R&D Program of China (2022YFE0137300), and National Natural Science Foundation of China (52078018).

*** Corresponding author. E-mail address:** wangjj@bjut.edu.cn.

道路融雪除冰技术生命周期内环境负荷分析

摘要：目前广泛采用的融雪化冰方法会对路面和环境产生一定的破坏。为了研究沥青路面融雪除冰技术在其生命周期内对环境的影响作用，以蓄盐路面、电缆加热路面、机械除冰雪三种不同融雪除冰技术为研究对象，基于生命周期分析（LCA）方法，将三种不同融雪除冰技术分为原料开采、拌合、运输、摊铺压实、除冰雪 5 个过程，量化分析三种不同融雪除冰技术生命周期内环境排放的影响。取全球变暖潜值（GWP）、酸化潜值（AP）、光化学臭氧形成潜值（POCP）、人体毒性潜值（HTP）四种环境影响类别来评价生命周期内融雪除冰技术的环境负荷，研究结果表明：在融雪除冰技术的各个阶段中，CO₂ 的排放均是最多；在整个生命周期内，三种融雪除冰技术产生的环境负荷的排序均为：GWP > HTP > AP > POCP；在四种影响类别中，不同融雪除冰技术中 GWP 占比均在 74% 以上。为了使不同融雪除冰技术的环境负荷进行比较，对不同融雪除冰技术的分析结果进行归一化处理，得出电缆加热路面产生的环境负荷最大，蓄盐路面产生的环境负荷最小。

关键词：沥青路面；环境负荷；生命周期；融雪除冰

Analysis of Environmental Load During the Life Cycle of Road Snow Melting and Deicing Technology

Abstract: At present, the widely used snow melting and deicing method will cause certain damage to the road surface and the environment. In order to study the impact of asphalt pavement snow melting and deicing technology on the environment during its life cycle, three different snow melting and deicing technologies such as pavement containing salt, cable heating pavement and mechanical ice removal are the research object, based on the life cycle assessment (LCA) method, the three different snow melting and deicing technologies are divided into five processes: raw material mining, mixing, transportation, paving compaction, and snow removal. Quantify the impact of environmental emissions over the life cycle of three different snow melting and deicing technologies. Four environmental impact Global Warming Potential (GWP), Acidification Potential (AP), Photochemical Ozone Creation Potential (POCP) and Human Toxicity Potential (HTP) were taken to evaluate the environmental load of snow melting and deicing technology during the life cycle, and the results showed that CO₂ emissions were the largest in all stages of snow melting and deicing technology. The environmental load of the three snow melting and deicing technologies is ranked through-out the life cycle: GWP > HTP > AP > POCP; In all four impact categories, GWP accounted for more than 74% of different snow melting and deicing technologies. In order to compare the environmental load of different snow melting and deicing technologies, the analysis results of different snow melting and deicing technologies are normalized, and it is concluded

that the environmental load generated by cable heating pavement is the largest, and the environmental load generated by pavement containing salt is the smallest.

Keywords: asphalt pavement; environmental load; life cycle; snow melting and deicing

Received: 24/07/2023

中图分类号: U415.6;U418.4+1

文献标志码: A

0 引言

路面状况是影响交通事故的一个重要因素,在北方的冬季,积雪结冰是影响路面状况的关键因素,而且会带来一系列的负面连锁反应。据统计,中国冬季 70%以上的公路会受到冰雪天气的影响,路面积雪结冰引起的交通事故约占冬季交通事故总量的 35%^[1],造成了大量的经济损失和人员伤亡。因此,为了保证交通的畅通和人员的安全,融雪除冰技术也越来越不可或缺。

道路融雪除冰技术分为主动式和被动式,被动式主要有机械法和融雪剂法,主动式主要有弹性路面铺装、能量转化型、自融式和涂层技术等^[2]。1975 年奥地利布伦纳公路上铺筑了蓄盐沥青路面(V-260),2008 年我国首次在陕西盐商高速公路和河南新郑高速公路铺筑蓄盐沥青路面,经试验论证蓄盐路面融雪方式污染小,较经济环保^[3]。豆怀兵等设计实验研究了盐化物替代矿粉的比例对沥青胶浆特性的影响,并提出融雪性能和融雪寿命的评价指标^[4]。1961 年, Henderson 等在美国的一座沥青混凝土桥面上安装了一套电缆加热装置,根据不同下雪量选择不同的电缆加热功率^[5]。目前,我国对于电缆加热路面的研究主要集中在室内试验和有限元分析方法总结其基本规律,为电缆加热设计提供理论支持。杨洁、李炎锋等人对发热电缆的技术指标进行了探讨,提出应着重考虑电缆的功率、环境因素,来设计满足路面融雪化冰的要求^[6,7]。Zhu X 等人研究了加热电缆的嵌入深度、嵌入间距与融雪的关系设计并构建

了电缆加热系统,减少了资源的浪费^[8]。Liu K 等人分析了基础设施融雪的能量,研究了电缆加热功率和风速对能耗和利用率的影响^[9]。

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是一种分析数据和信息的工具,可以准确地衡量各种活动或是产品的资源消耗和对环境影响^[10]。Chowdhury Raja 等人对建筑材料的环境影响进行研究,以能耗和碳排放量作为环境指标进行分析评价^[11]。郭猛等人通过对沥青生产方式以及路面破损的角度分析得出在未来应着重开发先进的技术,研发低成本、高性能的低碳环保型沥青产品^[12]。杨博采用基于流程的 LCA 法,研究了沥青混合料生产、建设、运营和使用过程中的能源消耗与气体排放^[13]。Almeida-Costa A 等人比较分析了温拌沥青与热拌沥青混凝土的经济和环境效益,结果表明,温拌沥青混合料每年可以减少 9500 吨 CO₂^[14]。张红波等人研究了橡胶改性沥青混合料路面的能耗和碳排放量,得出结论, SBS/橡胶改性沥青混合料的能耗与碳排放量高于基质沥青混合料^[15]。刘士南等人得出掺 RAP 的环氧再生路面较新建路面和普通再生路面减碳效果均在 52%以上^[16]。综上所述,生命周期评价方法已经应用到各种不同道路类型中,能够全面分析和评估道路建设各个环节对于环境的影响。

利用 LCA 方法对融雪除冰技术环境影响进行评估,有助于权衡不同阶段产生的环境负荷。但是目前针对沥青路面融雪除冰技术的研究主要还是集中在新材料的研发以及性能方面,缺少融雪除冰技术对于环境带来的影响考量。因此,本文选取蓄

盐路面、电缆加热路面、机械除冰雪三种不同融雪除冰技术为研究对象, 量化分析不同融雪除冰技术生命周期内对于环境的影响, 对其结果进行比较分析, 进而对不同融雪除冰技术做出准确的客观评价。

1 研究方法

根据 ISO 14040~14044 规范, LCA 技术框架由 4 个相互关联的部分组成^[17]:

- (1) 目的与范围的确定。融雪除冰技术 LCA 研究的目的是对几种融雪除冰技术生命周期内所产生的环境负荷进行分析评价, 为便于不同融雪除冰技术的量化计算和对比参考。本文规定铺筑 1km 结构为 4cm AC-13 上面层 (密度 $2.45\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$), 宽为 3.75m 的单行车道所消耗的沥青混凝土的量为 1 功能单位。
- (2) 清单分析。本文采用基于过程的清单分析方法, 将不同融雪除冰技术分为原料开采、拌合、运输、摊铺压实、除冰雪 5 个过程, 通过量化各个过程的污染物排放情况, 建立此系统的整个生命周期清单。
- (3) 影响评价。本文选择全球变暖潜值 (GWP)、酸化潜值 (AP)、光化学臭氧形成潜值 (POCP)、人体毒性潜值 (HTP) 四种影响类别, 对清单分析的结果进行定量评价, 确定对外部环境的影响。
- (4) 结果解释。对数据的结果进行分析, 提出有效可行的建议。

2 不同融雪除冰技术介绍

蓄盐沥青路面是用蓄盐添加剂替代集料的方式预先加入混合料里, 当降雪结冰温度降低时蓄盐添加剂主动析出达到融雪除冰效果的路面。蓄盐路面的融雪除冰机理可以用“稀溶液的依数性”来解释, 即蓄盐添加剂从浓度高的沥青结构内部扩散浓度低的道路表面, 降低道路表面水溶液

的冰点, 延缓冰雪的覆盖^[18]。

电缆加热路面是将发热电缆或电热材料埋置于路面内部, 通过外部电压使得电缆加热升温将电能转化为热能, 进而提高路面温度, 来融化道路表面的积雪。电缆加热路面的电缆敷设一般在面层之间, 目前电缆铺装的方法主要有两种, 一种是对路面进行开槽, 将发热电缆埋入, 用密封剂进行坑槽填充^[2], 但该方法在开槽和浇注过程中会对路面使用性能造成一定的损坏; 另一种比较常用的方法是在沥青路面基层铺筑完成的基础上, 铺筑好下面层后直接进行加热电缆的敷设, 最后进行上面层的铺筑。在实际工程应用方面, 电缆加热路面主要应用于隧道出入口、收费站、桥面等^[19,20], 但是电缆加热系统的控制策略依旧以主观为主, 因此, 电缆加热路面的运行控制策略优化是其研究的热点^[21]。

机械除冰雪法是利用除雪车将路面冰雪发生转移, 达到除雪的目的。适合于大面积机械化清除作业, 也是目前最主要的一种除雪方式。我国大部分使用国内生产或自行改造的设备, 基本能够满足道路除冰雪的要求。

有研究表明, 蓄盐路面有 5~6 年的除冰雪有效期, 随着技术的发展使用年限有所增加, 在不影响沥青路面性能的前提下, 蓄盐路面在 -5°C 左右时可满足融雪除冰的效果^[22-24]。一般电缆的设计使用寿命为 20 年, 但由于电缆老化以及车辆长期行驶等使电缆的使用寿命有所折减。在一般设计功率, 温度在 -4°C 时电缆加热路面融雪除冰效果较佳^[25]。机械除冰雪的使用条件以及适用温度范围较广, 除雪车的使用寿命一般至少 10 年以上。对于普通沥青路面的设计年限为 15 年, 但是 7-8 年就要进行一次大中修。由文献调研可知, 近十年北京的降雪时的气温条件下为 -4°C ^[24], 因此, 为了对比除雪阶段的排放, 本研究将融雪除冰技术的适用条件定为 -4°C 左右, 使用年限为 8 年。为研究沥青路面融雪除冰技术产生的环境负荷, 本文将融雪除冰技术分为原料生产、拌合、运输、摊铺压实、除冰雪 5 个过程, 其生命周期分析流程图

及系统边界如图 1 所示。

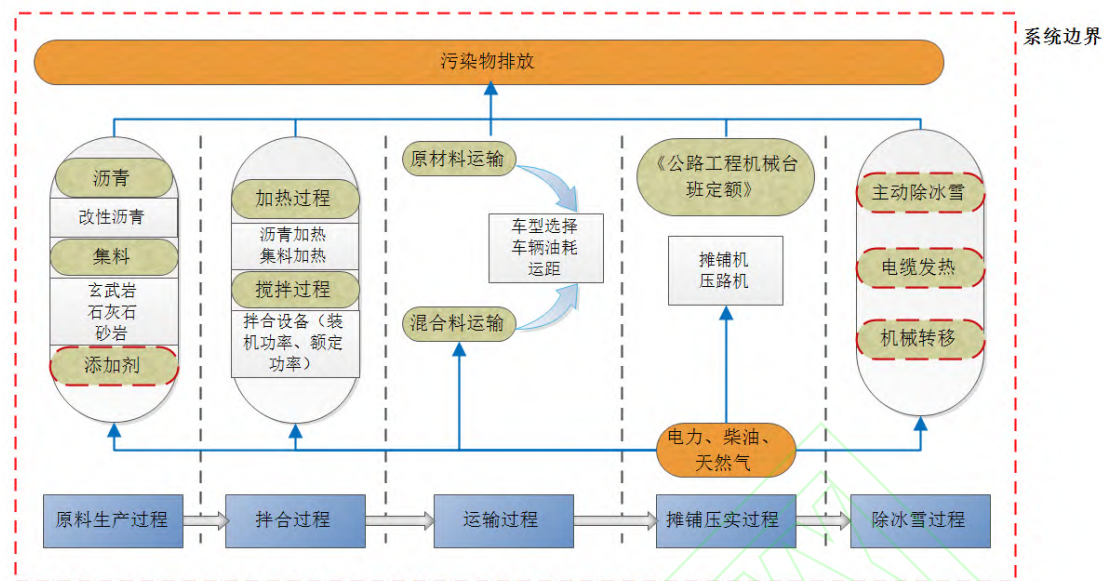


图 1 融雪除冰技术生命周期清单分析流程图

Fig. 1 Flowchart of Life Cycle Inventory Analysis for Snow Melting and Deicing technology

3 融雪除冰技术生命周期环境影响清单调查

3.1 蓄盐路面生命周期环境影响清单

蓄盐混合料设计是选取等体积部分替代普通集料的方式，由于蓄盐材料粒径范围为 0.075~4.75mm，故将蓄盐物质部分替代细集料的方式来制作蓄盐沥青混合料，替换方式采用等质量替换。蓄盐物质以 V-260 为例（主要成分是 CaCl_2 ，密度 $0.84\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ），这种盐化物材料强度小，在施工过程中会破碎、变形，且掺量小，因此对混合料的体积指标影响小^[26]。

有学者对于蓄盐物质的掺量以及沥青混合料的最佳沥青用量做了一些研究，研究表明，蓄盐物质的添加对于沥青混合料最佳沥青用量的影响不大，蓄盐添加剂掺量一般在 5%~6% 左右^[18,22,23,27]。因此，在本文蓄盐沥青混合料中，蓄盐沥青混合料油石比取为 4.8%，V-260 掺加量为 5.5%（质量分数）。石灰岩磨细矿作为矿粉（密度 $2.468\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ）。

3.1.1 原料生产过程

蓄盐路面采用沥青、蓄盐添加剂、玄

武岩、石灰石、砂岩等材料，本文对于粗集料和细集料均采用玄武岩，石灰岩磨细矿作为矿粉。根据贾晓娟博士计算出的我国沥青混凝土生产初级资源消耗清单^[28]，结合蓄盐路面中添加剂的掺量以及对集料的替换量，计算得出蓄盐路面资源消耗量，见表 1。

表 1 蓄盐路面原料生产过程资源消耗

Table 1 Resource Consumption in the Production Process of Raw Materials for Pavement Containing Salt

材料	改性沥青	玄武岩	石灰石	砂岩	V-260
消耗量 (t)	16.68092	2232324	17.37595	86.87977	20.031

根据蓄盐路面原料生产过程资源消耗量，结合我国沥青混凝土生产每吨初级资源污染物排放清单，见表 2，综合计算即可得到蓄盐路面原料生产过程中污染物排放清单。

表 2 初级资源污染物排放物清单

Table 2 Inventory of Pollutant Emissions from Primary Resources

名称	单位	改性沥青	玄武岩	石灰石	砂岩
CO_2	g	272354.6	17.2	17.2	14.2

SO ₂	g	1535.592	0.81	0.081	0.0422
NO _x	g	1350.057	0.161	0.161	0.152
CO	g	418.056		0.0586	0.0597
CH ₄	g	832.578			
NM VOC	g	263.624			
颗粒物	g	211.612	0.31	0.31	0.0689

3.1.2 拌合过程

我国沥青混合料的生产主要采用强制间歇式拌和设备，根据对沥青混合料生产设备及工艺流程的调查，拌合过程中所需能源包括电力、燃油、天然气等，电力主要用于机械系统的运转，包括热料提升、筛分等等工艺，其他能源主要用于集料、沥青等原材料的加热烘干^[29]。蓄盐沥青混合料按照普通热拌沥青混合方法拌合均匀，只是部分矿粉用蓄盐添加剂替代，其生产工艺基本一致。根据上述特点，清单分析中将沥青混合料拌合过程分为加热过程和搅拌过程两部分。

通过 ILCD 数据库以及相关文献，得到单位电力、柴油以及天然气的污染物排放清单信息，见表 3。

表 3 不同能源污染物排放清单
Table 3 Emission Inventory of Different Energy Pollutants

	类别	天然气	电力	柴油
		MJ	kWh	kg
污 染 物 排 放 (g)	CO ₂	67.583	945.938	3340
	SO ₂	0.027	2.749	0.865
	NO _x	0.171	2.541	0.595
	CO	0.032	0.293	0.175
	CH ₄	0.194	2.023	14.4
	NMVOC	0.022	0.015	1.33
	颗粒物	0.003	0.169	0.107

(1) 加热过程

沥青和集料在拌合之前都需要加热到预定温度。沥青在储存罐中通过导热油加热，并通过热油泵强制循环；集料的烘干加热是在烘干桶中进行，目前整个拌合楼的加热过程燃料均为天然气，整个过程所需的热能可以通过能量平衡方程来计算^[30]，因此可以得出油耗的理论计算公式为：

$$TE = (E_1 + E_2 + E_3 + E_4) \cdot (1 + CL) \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

$$E_1 = m_a \cdot C_a \cdot (t_1 - t_1') \quad (2)$$

$$E_2 = m_b \cdot C_b \cdot (t_2 - t_0) \quad (3)$$

$$E_3 = m_w \cdot C_w \cdot (100 - t_0) \quad (4)$$

$$E_4 = m_v \cdot C_v \cdot (t_3 - 100) \quad (5)$$

其中：

TE —所需总热量 (MJ)

$E_{1,2}$ —沥青、集料加热所需热量 (kJ)

E_3 —水变成水蒸气所需热量 (kJ)

E_4 —水蒸气蒸发所需热量 (kJ)

CL —热量损失系数，取值 27%^[31]

$m_{a,b,w}$ —沥青、集料、水的质量 (kg)

$C_{a,b,w}$ —沥青的比热容，取 1.34/ (kJ kg⁻¹ °C⁻¹)；集料的比热容，取 0.92/ (kJ kg⁻¹ °C⁻¹)；水的比热容，取 4.2/ (kJ kg⁻¹ °C⁻¹)

C_v —水蒸气的比热容，取 1.83/ (kJ kg⁻¹ °C⁻¹)

$t_{1,2}$ —沥青、集料加热温度

t_1' —沥青储存温度，取 130°C

t_0 —环境温度 (°C)

t_3 —水蒸气完全蒸发的温度，按 130°C 时全部蒸发考虑

计算过程中选定集料的含水量为 4%，根据上述假设及数据，由式 (1) ~ (5) 计算模型，可计算得出混合料加热阶段产生的热值总量为 67942.61MJ。

(2) 搅拌过程

不同型号的拌合站，伴有不同的装机功率和不同的生产效率。本文通过文献调研，搜集得到了目前常用的混合料拌合设备的装机功率等技术参数^[32]，初步了解沥青混合料拌和设备的电力消耗情况。不同拌合设备其耗电系数，见表 4。

表 4 不同型号拌合设备技术参数

Table 4 Technical Parameters of Different Models of Mixing Equipment

设备型号	装机功率 (kW)	额定生产率 (t·h ⁻¹)	能耗率 (kWh·t ⁻¹)
日工 NBD 320ABZ	750	320	2.34375
日工 NBD 240ABZ	600	240	2.5
三一重工 LB3000	650	240	2.7083

三一重工 LB4000	750	320	2.34375
南方路机 LB3000	685	240	2.85417
南方路机 LB4000	865	320	2.703125
均值		2.575521	

取其电耗系数平均值 2.575521kWh·t⁻¹ 进行计算。将混合料加热和搅拌过程进行合并，综合得到拌合过程污染物排放清单。

3.1.3 运输过程

运输过程分为原材料的运输和混合料的运输两部分，运输过程污染物的排放主要影响因素是运输车辆的油耗以及运距的大小。

(1) 原材料运输

原材料运输是指沥青、碎石、矿粉、等从加工厂运输到混合料拌合站的过程。通过调研发现，运料阶段的污染物排放受运输距离、车辆性能及行驶条件的影响，预算定额充分考虑了影响运输过程的主要因素，以《公路工程预算定额》给出的运距范围参考并结合短运距较优的原则，北京地区沥青平均运距 218km^[33]。与沥青运输不同，集料运输成本注定其不适合长距离运输，本研究中，集料的运输距离采用 50km，其取值可切合项目实际情况进行调整。由沥青和集料的运距，结合马丽萍等计算的城市道路重型货车生命周期清单^[34]，计算得出原材料运输阶段污染物排放清单。

(2) 混合料运输

对混合料运输过程污染物排放的量化从自卸汽车的燃油消耗出发，采用定额法确定能耗部分。依据《公路工程预算定额》和《公路工程机械台班费用定额》，得到不同运载能力的运输车辆在不同运距下的运输工作台班数量以及各类运输车辆单位台班的柴油消耗量。表 5 为不同载重类型的自卸汽车在运输混合料时的柴油消耗量。对于车辆空载返程，燃油消耗以满载情况的 70%进行折减^[35]。

表 5 1000m³ 沥青混合料运输设备油耗量
Table 5 Transport 1000m³ Asphalt Mixture Diesel Consumption

设备	台班数量	柴油消耗 (满载) (kg/台班)	柴油消耗 (空载) (kg/台班)
	第一个	每增运	

	1km	0.5km		
15t 以 内自卸 汽车	6.91	0.38	67.89	47.523
20t 以 内自卸 汽车	5.14	0.41	77.11	53.977
30t 以 内自卸 汽车	3.88	0.32	90.1	63.07

对沥青混合料运输的基本要求是确保混合料的温度，不离析并且具有足够的运量。因此，应采用载质量大于 15t 的大型自卸汽车运送沥青混合料到摊铺现场，减少摊铺机前经常换车卸料的情况，故本研究混合料运输设备最终选定为 20t 以内自卸汽车。同时，为保证沥青混合料的运输成本，沥青混合料的运输距离也不宜过长，本文取平均运距为 5km。

结合以上的计算规则，根据路面工程的混合料工程量及混合料运距等，计算出混合料运输阶段柴油的消耗量，其计算结果为 165.562881kg。

3.1.4 摊铺压实过程

随着我国公路施工标准化建设的不断完善，沥青混合料摊铺、碾压过程中的能耗统计分析已经具备了一定的基础条件。由《公路工程机械台班费用定额》查到 1000m³ 沥青混凝土摊铺碾压过程机械台班消耗及每台班柴油消耗量，计算单位沥青混合料摊铺、碾压过程的能耗，见表 6。

表 6 1000m³ 沥青混凝土混合料摊铺碾压过程机械台班消耗

Table 6 1000m ³ Asphalt Mixture Paving and Rolling Process Mechanical Shift Consumption				
tion				
设备名 称	消耗 台班	柴油消 耗 (kg/ 台班)	柴油消耗 量 (kg)	
12.5m 以 内沥青 混合料 摊铺机	1.46	136.41	199.1586	
6-8t 光轮 压路机 (初 压)	2.87	19.33	55.4771	
16~20 轮 胎压路	0.84	50.29	42.2436	

机（复压）			
12-15t 光轮压路机（终压）	4.31	40.46	174.3826

本文取沥青混合料密度为 $2.4\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$ ，通过计算可得 1000m^3 沥青混合料摊铺、碾压过程共消耗柴油 471.2619kg ，所以 1 功能单位蓄盐沥青混合料摊铺、碾压过程柴油消耗量 70.689285kg 。

3.1.5 除冰雪过程

对于蓄盐路面除冰雪阶段，由于路面它本身添加了蓄盐添加剂，具有主动除冰雪的效果，故在此阶段没有污染物的产生，不再对此阶段进行具体分析。

最后，将蓄盐沥青混合料生命周期内原料生产、拌合、运输、摊铺碾压阶段内的清单结果进行整合，即可得到蓄盐路面生命周期清单。

3.2 电缆加热路面生命周期分析

3.2.1 原料生产过程

电缆加热路面是在普通沥青路面的基础上铺装的，故其生命周期分析也是从普通沥青路面分析的基础上进行的。电缆加热路面上面层材料组成见表 7。

表 7 上面层材料组成

Table 7 Composition of Upper Materials					
成分	粗集料	细集料	砂	矿粉	改性沥青
比例 (%)	25	45	25	5	4.8

对电缆加热路面 1 功能单位的沥青混凝土资源消耗进行计算，计算结果见表 8。

表 8 电缆加热路面生产过程中的资源消耗

Table 8 Resource Consumption in the Production of Cable Heating Pavement					
材料	改性沥青	玄武岩	石灰石	砂岩	总计
消耗 (t)	17.5	245	17.5	87.5	367.5

根据电缆加热路面资源的消耗清单，结合表 2 初级资源污染物的排放清单，综合计算得到电缆加热路面原料生产过程中

污染物排放清单。

3.2.2 拌合过程

由于沥青混合料的生产主要采用强制间歇式拌合设备，沥青混合料生产设备及工艺流程都是一致的，故此阶段对污染物排放的分析与蓄盐路面的拌合阶段完全一致。

加热过程根据电缆加热路面原料生产的相关数据，由式 (1) ~ (5) 计算模型，可计算产生的热值总量为 70006.26MJ 。同理，根据表 3 中天然气产热的污染物排放清单，结合计算的热量即可得到电缆加热路面拌合过程污染物的排放。

搅拌过程仍采用电耗系数平均值进行计算，根据表 3 中电力的污染物排放清单信息，结合耗电量进行计算。

3.2.3 运输过程

为了方便不同融雪除冰技术的对比分析，运输阶段采用的车型以及运距均相同。由于蓄盐物质是等量替换的，故不再考虑这部分的差异，仍采用蓄盐路面运输阶段的计算规则，故此过程的污染物分析结果与蓄盐路面运输阶段污染物排放清单一致。不再进行具体分析。

3.2.4 摊铺压实过程

摊铺压实过程的污染物主要是由于摊铺碾压机械配置产生的，其排放均是通过《公路工程预算定额》中各种路面材料摊铺碾压的机械台班定额乘以《公路工程机械台班费用定额》中机械单位台班的燃油消耗量，计算得出的。

3.2.5 电缆加热过程

电缆加热阶段是以电力为能源，分析电缆加热过程的电力消耗得出此过程产生的污染物。张登春等人通过室内试验对桥梁发热电缆进行了研究，得出桥面温度控制在 $2.5^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$ 之间，可有效防止路面结冰^[36]；宫成兵、张登春、唐祖全等人通过研究指出道路表面温度达到 $2^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$ 时融雪效果最佳^[20,36,37]。用于道路融雪化冰的发热电缆系统的加热功率对路面达到理想融雪化冰的时间和能耗均有着较大的影响，一般推荐铺装功率为 $250\sim 400\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。武海琴考虑了发热电缆的铺装功率，结果表明，铺装功率为 $270\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时，可以满足实时融雪要求且效果良好^[23]。李炎锋等人提出发

热电缆用于道路融雪除冰的数学模型，并利用有限元分析软件分析电缆试件表面的温度变化，验证了模型的正确性，得出电缆铺装功率为 $250\sim 350\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时即可满足一般情况下道路融雪的要求^[7]。Lai Y 等人提出了埋在机场路面的碳纤维格栅融雪方法，合理设置了融雪试验，从现场数据中得出融雪输入功率在 $200\sim 350\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间可以满足北京天气情况需要^[38]。因此，本文采用铺装功率为 $300\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。由文献调研可知，近十年的降雪时的气温条件下为 -4°C ，而当室外气温 -4°C 时，上表面平均温度在 3 小时左右即可达到融雪要求^[38]。

综合电缆加热路面原料生产、拌合、运输、摊铺压实、电缆加热 5 个阶段污染物的排放，得出电缆加热路面生命周期清单。

3.3 机械除冰雪生命周期分析

机械除冰雪法原料生产阶段、拌合阶段、运输阶段、摊铺碾压阶段分析结果与电缆加热路面其过程一致，故此部分不再进行详细分析。详细分析机械除冰雪的除冰雪过程的环境影响，除雪车工作过程产生的污染物排放是由于消耗的柴油产生的，因此分析除雪车工作过程的油耗即可得出此阶段产生的污染物。由于不同车型的除雪车的燃油消耗不同，在具体的实施案例中，可以采用具体的设备参数进行计算。本文通过调研，以中联重科生产的 ZLJ5163TCXJE4 型除雪车为研究对象，其参数见表 9。已知柴油的密度为 $0.83\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，取其作业速度为 $20\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ，燃油消耗为 $66.67\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ 。根据除雪车的燃油消耗以及作业速度，结合柴油的环境排放清单，得到除雪车工作过程产生的污染物。

表 9 除雪车参数

Table 9 Snowplow Parameters	
设备型号	ZLJ5163TCXJE4
总质量	16000kg

吹嘴作业旋转范围（可任一或定点）	0~180°
吹雪宽度	3.5~12m
作业速度	0~30km·h ⁻¹
作业噪声	<98dB
燃料种类	柴油
作业油耗	25~75L·h ⁻¹

综合电缆加热路面各个过程的污染物排放清单，得出机械除冰雪法的生命周期清单。

4 不同融雪除冰技术环境影响评价

4.1 不同融雪除冰技术生命周期清单

综合以上三种不同融雪除冰技术环境影响清单调查结果，得到蓄盐路面、电缆加热路面、机械除冰雪三种融雪除冰技术生命周期清单。

图 2 显示了不同融雪除冰技术的污染物排放情况，从图 2 (a) ~ (c) 可知，三种融雪除冰技术各个过程中污染物排放最多的均是 CO₂，且主要集中在原料生产过程和拌合过程。在三种融雪除冰技术的运输过程中，颗粒物质的排放尤其显著，仅次于 CO₂，产生这个结果的原因是运输过程运输车辆由于柴油燃烧产生了大量的尾气，而车辆尾气中含有大量的颗粒污染物。图 2 (d) 显示了三种融雪除冰技术生命周期内污染物排放的对比图，可以发现三种融雪除冰技术生命周期内污染物排放最多的均是 CO₂，其次是颗粒物质，而 CO₂ 是引起全球变暖的主要污染物，颗粒污染物对于人类身体健康有着极大的危害，为了量化污染物产生的影响，需要对三种融雪除冰技术生命周期污染物排放的结果进一步分析解释。

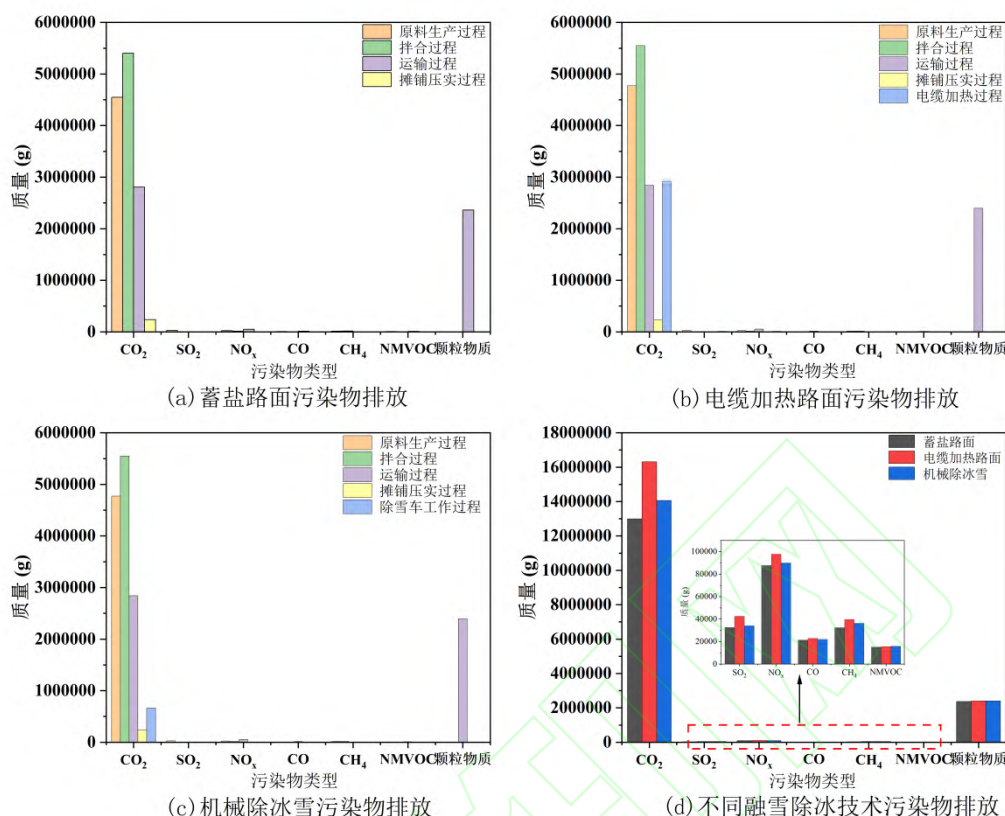


图 2 不同融雪除冰技术污染物排放

Fig. 2 Pollutant Emissions from Different Snow Melting and Deicing Technologies

4.2 影响评价和结果解释

4.2.1 特征化

对不同融雪除冰技术污染物排放以影响类型为代表进行综合性分析评价，为了量化不同清单项目对于某一环境影响类型的影响强度，选择全球变暖潜值（GWP）、酸化潜值（AP）、光化学臭氧形成潜值（POCP）、人体毒性潜值（HTP）四个环境影响类型进行特征化表征。特征化模型采用常用的当量模型，这种模型需要特征化因子作为转换基础^[28]，模型计算公式如下：

$$E_j = \sum [Q_{ji} \times F_{ji}] \quad (6)$$

式中：

E_j —第 j 种环境影响类型的特征化结果

Q_{ji} —第 j 种环境影响类别中第 i 种污染物排放量

F_{ji} —第 i 种污染物对第 j 种环境影响

的特征化因子

参考相关研究确定的各类影响类型对应的环境负荷项目及特征化因子，根据特征化计算的逻辑公式，汇总得到不同融雪除冰技术环境影响特征化计算结果，见表 10。

表 10 不同融雪除冰技术环境影响的特征化结果

Table 10 Characterization Results of Environmental Impacts of Different Snow Melting and Deicing Technologies

影响类型	单位	蓄盐路面	电缆加热路面	机械除冰雪
GWP	g CO ₂ -eq	1.38×10 ⁷	1.73×10 ⁷	1.50×10 ⁷
AP	g SO ₂ -eq	9.40×10 ⁴	1.11×10 ⁵	9.72×10 ⁴
POCP	g C ₂ H ₂ -eq	1.09×10 ⁴	1.40×10 ⁴	1.13×10 ⁴
HTP	g 1,4-DCB -eq	2.11×10 ⁶	2.15×10 ⁶	2.14×10 ⁶

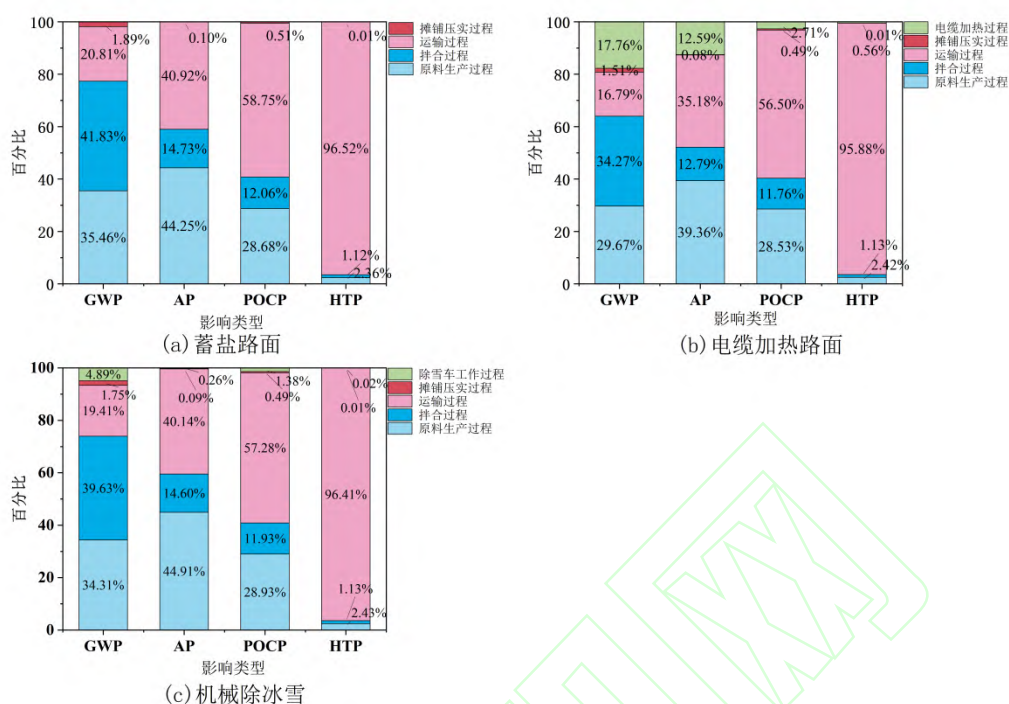


图 3 不同融雪除冰技术生命周期各过程环境影响贡献百分比

Fig. 3 Percentage Contribution of Environmental Impact of Each Process in the Life Cycle of Different Snow Melting and Deicing Technologies

图 3 显示了三种不同融雪除冰技术生命周期各过程环境影响贡献百分比，从图 3 可知，对于四种影响类别，三种融雪除冰技术各个过程的贡献百分比虽有所不同，但是总体上影响类别的贡献百分比地位是相同的。对于 GWP，拌合过程占主体地位，占比在 34% 以上，其次是原料生产过程，占比在 29% 以上；对于 AP，原料生产过程占主体地位，占比在 40% 左右，其次是运输过程，占比在 35% 左右；对于 POCP 和 HTP，运输过程均占主体地位，其中，运输过程对于 POCP 的贡献百分比超过 50%，而对于 HTP 的贡献百分比更是高达 95% 以上。特别地，对于电缆加热路面和机械除

冰雪，由于除冰雪过程消耗的能源，电缆加热过程对于四种影响类型贡献百分比分别为：17.76%、12.59%、2.71%、0.56%；除雪车工作过程对于四种影响类型的贡献百分比分别为：4.89%、0.26%、1.38%、0.02%。由此可知，从整个生命周期来看，机械除冰雪的除冰雪过程较于电缆加热路面更为优势。总的来看，对于融雪除冰技术生命周期环境影响，原料开采过程和运输过程是缓解环境影响的关键。同时，对于碳排放的影响，运输过程的环境影响贡献百分比也不容小觑，贡献百分比也约达 20%，在考虑减排时也要重点关注。

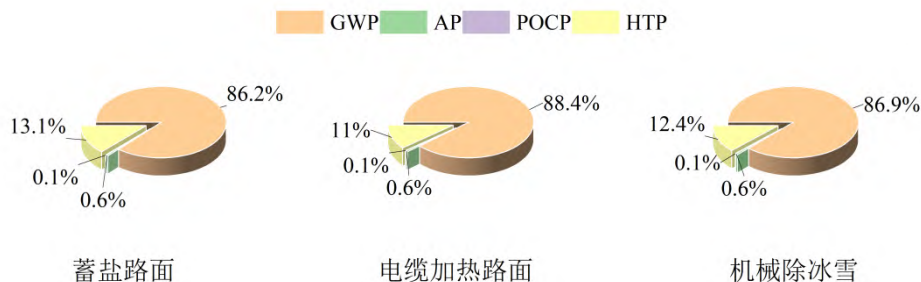


图 4 不同融雪除冰技术环境影响类型百分比

Fig. 4 Percentage of Environmental Impact Types of Different Snow Melting and Deicing Technologies

图 4 显示了蓄盐路面、电缆加热路面、机械除冰雪三种融雪除冰技术的环境影响类型百分比，可以发现，三种不同融雪除冰技术环境影响占比最大的是均是全球变暖潜值 GWP，占比超过了 80%，处于支配地位；其次是人体毒性潜值 HTP，占比在 11%以上，而对于酸化潜值 AP 和光化学臭氧形成潜值 POCP 的影响很小。

4.2.2 归一化

在进行特征化运算得到计算结果后，各种环境负荷的当量值的单位不同，无法进行其大小的比较，因此，需进行归一化处理，以调整结果以具有通用维度^[39]。归一化模型为：

$$N_j = \frac{E_j}{R_j} \quad (7)$$

式中：

N_j —第 j 种环境影响的归一化指标

R_j —第 j 种环境影响类别的归一化基准

目前大多采用世界范围内的归一化基准值^[10]，相关的归一化基准值见表 11。

表 11 生命周期评价归一化基准

Table 11 Life Cycle Assessment Normalized Benchmarks

影响类型	单位	当量总数
GWP	kg CO ₂ -eq	3.86×10^{13}
AP	kg SO ₂ -eq	2.99×10^{11}
POCP	kg 乙烯-eq	4.55×10^{10}
HTP	kg 1,4 二氯苯-eq	4.98×10^{13}

对不同融雪除冰技术生命周期各类环境影响类型特征化结果进行归一化，计算结果为无量纲，计算结果见图 5。

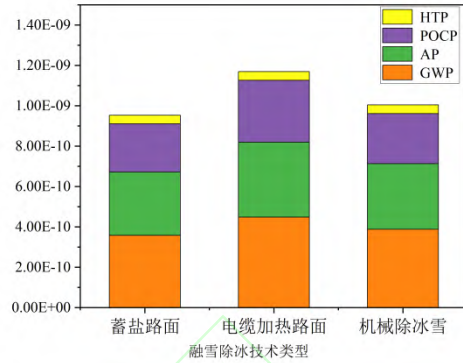


图 5 不同融雪除冰技术的归一化结果

Fig. 5 Normalization Result of Different Snow Melting and Deicing Technologies

图 5 显示了不同融雪除冰技术的归一化结果，由图 5 可以知道，不同融冰除雪技术中，环境负荷最大的是电缆加热路面；其次是机械除冰雪法，其环境负荷与电缆加热路面相差不大，占电缆加热路面的 86%；蓄盐路面的环境负荷最小，占电缆加热路面的 82%。因此可知，蓄盐路面为最优势融雪除冰技术，为了缓解融雪除冰技术对于环境负荷产生的影响，在今后对于蓄盐物质的研发应更被关注。

5 结 语

为了进一步推进道路融雪除冰技术的研究，本文分析了蓄盐路面、电缆加热路面、机械除冰雪三种融雪除冰技术生命周期内的环境负荷，得出结论主要如下：

- (1) 运用基于过程的生命周期评价方法，研究了三种融雪除冰技术生命周期内污染物排放，三种融雪除冰技术污染物排放最多的均是 CO₂，影响类型排序均为全球变暖潜值 > 人体毒性潜值 > 酸化潜值 > 光化学臭氧形成潜值。
- (2) 不同融雪除冰技术对环境负荷的影响为：电缆加热路面影响最大，其次为机械除冰雪，影响最小的是蓄盐路面。
- (3) 由于除雪车工作过程产生的污染物相较于电缆加热过程较小，在特殊大雪

天气, 可以将蓄盐路面与除雪车结合, 在产生环境负荷较小的情况下, 进一步提高除冰雪的效率。

- (4) 对蓄盐路面分析时, 蓄盐添加剂的生产也会产生相应的污染, 但是由于目前对于蓄盐添加剂的掺量较少以及相关研究甚少, 本文忽略了这部分产生的污染, 这也是本文的局限之处, 今后会做进一步的研究。再者, 冰雪路面往往伴随一些极端天气出现, 对应的能耗等与文章设定条件会有所不同, 在后续的研究中我们将进行更深入的探讨和分析, 以得到更加准确和实用的结论。文章没有考虑到生产成本以及不同地区下雪的频率, 下一阶段可以从多个角度进行分析评价, 进一步推动融雪除冰技术的发展。

参考文献

References:

- [1] 徐慧宁, 谭忆秋, 周纯秀, 等. 太阳能-土壤源热能耦合桥面融雪系统温度分布特性的研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(11): 1920-1925.
XU Hui-ning, TAN Yi-qiu, ZHOU Chun-xiu, et al. Study on temperature distribution characteristic in solar-ground source coupled snow-melting system for bridge deck[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(11): 1920-1925.
- [2] 谭忆秋, 张驰, 徐慧宁, 等. 主动除冰雪路面融雪化冰特性及路用性能研究综述[J]. 中国公路学报, 2019 (4): 1-17.
TAN Yi-qiu, ZHANG Chi, XU Hui-ning, et al. Snow melting and deicing characteristics and pavement performance of active deicing and snow melting pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019 (4): 1-17.
- [3] 梁嵩巍, 杨明, 罗金, 等. 高速公路 MSA 路面与融雪路面使用性能比对试验及融雪机理的研究[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2009, 5(7): 42-44.
- LIANG Song-wei, YANG Ming, LUO Jin, et al. Comparison test of performance of highway MSA pavement and snowmelt pavement and study on snowmelt mechanism[J]. Highway Transportation Science and Technology: Applied Technology Edition, 2009, 5(7): 42-44.
- [4] 豆怀兵. 超薄罩面盐化物自融雪沥青混合料组成与性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
DOU Huai-bing. Design and pavement performance of ultra-thin snow melt salt asphalt mixture pavement overlay[D]. Xian: Chang'an University, 2015.
- [5] HENDERSON D. Experimental roadway heating project on a bridge approach[R]. Highway Research Record, 1965, 111(14):14-15.
- [6] 杨洁, 李海涛, 史凤贤, 等. 电热法除路面冰雪技术探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(5): 162-165.
YANG Jie, LI Hai-tao, SHI Feng-xian, et al. Technology of road deicing using heat cable method[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009, 5(5): 162-165.
- [7] 李炎锋, 胡世阳, 武海琴, 等. 发热电缆用于路面融雪化冰的模型[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(12): 1298-1303.
LI Yan-feng, HU Shi-yang, WU Hai-qin, et al. Model of heating cable for snow melting and ice melting on pavement[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(12): 1298-1303.
- [8] ZHU X, ZHANG Q, DU Z, et al. Snow-melting pavement design strategy with electric cable heating system balancing snow melting, energy conservation, and mechanical performance[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 177: 105970.
- [9] LIU K, HUANG S, WANG F, et al. Energy consumption and utilization rate analysis of automatically snow-melting

- system in infrastructures by thermal simulation and melting experiments[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 138: 73-83.
- [10] CURRAN, MARY Ann. Life cycle assessment handbook: a guide for environmentally sustainable products[M]. New York: John Wiley & Sons, 2012.
- [11] CHOWDHURY R, APUL D, Fry T. A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(4): 250-255.
- [12] 郭猛, 任鑫, 焦峪波, 等. 沥青及沥青混合料老化与抗老化研究综述[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 41-59.
- GUO Meng, REN Xin, JIAO Yu-bo, et al. Review of aging and antiaging of asphalt and asphalt mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 41-59.
- [13] 杨博. 沥青路面节能减排量化分析方法及评价体系研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- YANG Bo. Quantitative method and evaluation system of energy-saving and emission-reduction for asphalt pavement [D]. Xian: Chang'an University, 2012.
- [14] ALMEIDA-COSTA A, BENTA A. Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 2308-2317.
- [15] 张红波, 陈海涛, 徐升, 等. 橡胶改性沥青混合料路面建设能耗与碳排放评价[J]. 公路工程, 2021, 46(3): 154-164.
- ZHANG Hong-bo, CHEN Hai-tao, XU Sheng, et al. Evaluation on energy consumption and carbon emission of rubber modified asphalt mixture pavement[J]. Highway Engineering, 2021, 46(3): 154-164.
- [16] 刘士南, 王厚植, 张磊, 等. 基于全寿命周期的环氧再生路面碳排放研究[J]. 材料导报, 2022, 36(S2): 121-128.
- LIU Shi-nan, WANG Hou-zhi, ZHANG Lei, et al. Study on carbon emissions of epoxy recycled pavement based on LCA[J]. Materials Reports, 2022, 36(S2): 121-128.
- [17] 翟一杰, 张天祚, 申晓旭, 等. 生命周期评价方法研究进展[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 446-455.
- ZHAI Yi-jie, ZHANG Tian-zuo, SHEN Xiao-xu, et al. Development of life cycle assessment methods[J]. Resources Science, 2021, 43(3): 446-455.
- [18] 刘状壮, 沙爱民, 蒋玮. 蓄盐沥青路面研究进展: 盐化物材料、混合料及其性能与评价[J]. 中国公路学报, 2019, 32(4): 18.
- LIU Zhuang-zhuang, SHA Ai-min, JIANG Wei. Advances in pavements containing salts: additives, mixtures, performances, and evaluation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4): 18.
- [19] 彭余华, 鲍梦捷, 陈绍辉. 内置碳纤维发热线融冰技术的现状与发展[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(2): 29-33.
- PENG Yu-hua, BAO Meng-jie, CHEN Shao-hui. Current situation and development of deicing technology with built-in carbon-fiber heating wires[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016, 33(2): 29-33.
- [20] 宫成兵. 基于加热的寒区公路隧道路面防滑技术的试验研究与数值分析[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- GONG Cheng-bing. Key technology study on cold-region highway tunnel road anti-skidding[D]. Xian: Chang'an University, 2013.
- [21] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2020[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-66.
- Editorial Board of China Journal of

- Highway and Transport. Review on China's pavement engineering research • 2020[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 1-66.
- [22] 谭忆秋, 孙嵘蓉, 郭猛, 等. 蓄盐沥青混合料除冰雪性能研究[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1): 23-29.
- TAN Yi-qiu, SUN Rong-rong, GUO Meng, et al. Research on deicing performance of asphalt mixture containing salt[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(1): 23-29.
- [23] 王锋, 韩森, 张丽娟, 等. 融冰雪沥青混合料盐分溶析试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(6): 16-19+55.
- WANG Feng, HAN Sen, ZHANG Lijuan, et al. Efflorescence experiment of asphalt mixture with salt for melting snow and ice[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(6): 16-19+55.
- [24] LIU Z, XING M, CHEN S, et al. Influence of the chloride-based anti-freeze filler on the properties of asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2014, 51: 133-140.
- [25] 武海琴. 发热电缆用于路面融雪化冰的技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2005.
- WU Hai-qin. A study of applied technology in deicing and melting snow on road surface by electric heating cable[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2005.
- [26] 崔龙锡. 蓄盐类沥青混合料研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
- CUI Long-xi. The research on asphalt mixture include salt[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.
- [27] 李宜锋. 蓄盐沥青混合料路用性能及析出规律[J]. 中国建材科技, 2020, 29(4): 37-39+114.
- LI Yi-feng. Road performance and precipitation law of salt storage asphalt mixture[J]. China Building Materials Science & Technology, 2020, 29(4): 37-39+114.
- [28] 贾晓娟. 沥青路面材料全生命周期评价研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- JIA Xiao-juan. Life cycle assessment of bitumen pavement materials[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [29] 彭波, 邓海龙, 曹世江, 等. 热拌沥青混合料碳排放量化与评价体系[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2019, 39(3): 1-9.
- PENG Bo, DENG Hai-long, CAO Shijiang, et al. Carbon emission quantification and evaluation system of hot mix asphalt mixture[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2019, 39(3): 1-9.
- [30] SANTOS J, BRESSI S, CEREZO V, et al. Life cycle assessment of low temperature asphalt mixtures for road pavement surfaces: A comparative analysis[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 138: 283-297.
- [31] WEST R, RODEZNO C, JULIAN G, et al. Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies[J]. Nchrp Report, 2014.
- [32] 蔺瑞玉. 沥青路面建设过程温室气体排放评价体系研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- LIN Rui-yu. Research on greenhouse gas emission evaluation system for asphalt pavement construction[D]. Xian: Chang'an University, 2014.
- [33] 邹晶晶. 沥青混合料生产环境负荷数据库及绿色发展评价体系研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- ZOU Jing-jing. Environmental burden database and green development evaluation system for asphalt mixture production[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [34] 马丽萍, 王志宏, 龚先政, 等. 城市道路两种货车运输的生命周期清单分析

- [C]// 中国材料研究学会. 2006 年材料科学与工程新进展——“2006 北京国际材料周”论文集. 中国:中国材料研究学会, 2006: 17-22.
- MA Li-ping, WANG Zhi-hong, GONG Xian-zheng, et al. Life cycle inventory analysis of two types of truck transportation on urban roads[C]// Chinese Materials Research Society. New Progress in Materials Science and Engineering in 2006——Proceedings of "2006 Beijing International Materials Week". China: Chinese Materials Research Society, 2006:17-22.
- [35] 刘诗蕊. 再生沥青路面全寿命周期环境评估及不确定性研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2022.
- LIU Shi-rui. Life cycle environmental assessment and uncertainty study of recycled asphalt pavement[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2022.
- [36] 张登春, 章照宏, 袁江雅, 等. 公路桥梁发热电缆除冰系统试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(11): 90-95.
- ZHANG Deng-chun, ZHANG Zhao-hong, YUAN Jiang-ya, et al. Experimental research on deicing system by heating cables for highway bridges[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(11): 90-95.
- [37] 唐祖全, 李卓球, 侯作富, 等. 导电混凝土电热除冰化雪的功率分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2002(3): 101-105+116.
- TANG Zu-quan, LI Zhuo-qiu, HOU Zuo-fu et al. Power analysis on deicing and snow melting by electrically conductive concrete[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002(3): 101-105+116.
- [38] LAI Y, LIU Y, MA D. Automatically melting snow on airport cement concrete pavement with carbon fiber grille[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 103: 57-62.
- [39] PENNINGTON D W, POTTING J, FINNVEDEN G, et al. Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice[J]. Environment international, 2004, 30(5): 721-739.